Concours CGénial 2017

Lycée JJ Henner, ALTKIRCH

UN CHANT IMPENSABLE

Caroline Huguel ,Valentine Jander , Jérémie Klein

Encadrés par F. Martin

Résumé

Dans le monde, le sable se localise dans des espaces bien définis. Les plages et les dunes regroupent la majorité du sable terrestre. Certaines dunes de sable présentent la caractéristique d'émettre un son particulier, phénomène qui fascinait déjà les voyageurs au 13ème siècle.
Notre travail a permis de répondre à la problématique : « **Comment un tel son peut-il être émis au cours d'une avalanche de sable ?** ».
Nous avons étudié les caractéristiques des sables chantants à travers le monde, et du son émis, en collaborant avec Mr Dagois-Bohy, chercheur, et des collectionneurs de sable.
A partir de l'exploitation des mesures effectuées sur le terrain ou au lycée, nous avons alors proposé un modèle mathématique expliquant ce phénomène, appelé « chant des dunes ».
Et enfin, nous avons mis en application le fruit de nos recherches, en mettant au point une recette permettant de faire chanter des microbilles de verre dans notre laboratoire.

PLAN

I. Introduction

II. Le sable : une matière inclassable ?
- 1) Solide ou liquide ?
- 2) Forme d'un tas

III. Avalanche de sable
- 1) Montage expérimental
- 2) Des aides précieuses : Simon Dagois-Bohy et des arénophiles
- 3) Diamètre des grains : étude statistique

IV. Du sable qui chante ?
- 1) Entretien avec S. Dagois-Bohy
- 2) La dune, un instrument de musique ?
- 3) Valentine part au Maroc
- 4) De retour au labo : nouvel essai

V. Essai de modélisation
- 1) Avec des billes en verre
- 2) Confrontation de nos mesures au modèle théorique
- 3) Pour aller plus loin

VI. Conclusion

I. Introduction

Les grands-parents de Valentine sont arénophiles : ils collectionnent des échantillons de sable du monde entier. Au cours de l'un de leurs nombreux voyages, ils ont assisté à un phénomène étrange qu'ils ont enregistré, dans la Death Valley, en Californie. En créant une avalanche de sable sur la dune Eureka, un grondement étonnant a été émis.

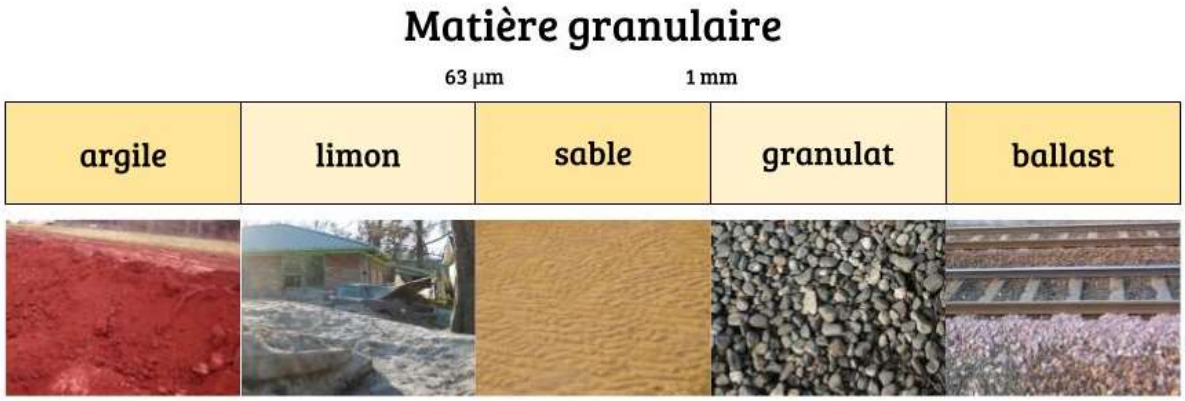
Marco Polo (vers 1300) a mentionné dans ses écrits le phénomène, inquiétant pour certains, merveilleux pour d'autres : « Les sables qui chantent parfois remplissent l'air avec les sons de toutes sortes d'instruments de musique, et aussi le bruit des tambours et du choc des armes. »
Pour les Bédouins, le bruit trahit la présence des djinns, esprits qui rôdent dans le désert, phénomène raconté dans « La peur », de Guy de Maupassant (1882).

Dans le monde, le sable se localise dans des espaces bien définis. Les plages et les dunes regroupent la majorité du sable terrestre. Dans le Monde, certaines dunes présentent la caractéristique d'émettre un son particulier, appelé « le chant des dunes ». Nous avions déjà étudié certaines propriétés de la matière granulaire, mais nous avons poussé ces études encore plus loin encore, en consacrant à ce sable toute notre attention. Nos recherches assidues ont été nourries par un rêve que nous avions tous les trois : reproduire en laboratoire ce chant si singulier des dunes.

II. Le sable : une matière inclassable ?

1) Solide ou liquide ?

Le sable est une matière fascinante, de par le mystère qu'il soulève : est-il liquide ou solide ?
En effet, si les minuscules grains qui le constituent sont bien solides, le sable nous glisse entre les doigts comme de l'eau, comme un liquide. Il combine certaines caractéristiques des liquides et d'autres des solides, c'est pourquoi sa nature est si ambiguë.
Le sable est une matière granulaire, au même titre que la semoule, le sucre, ou encore la farine.

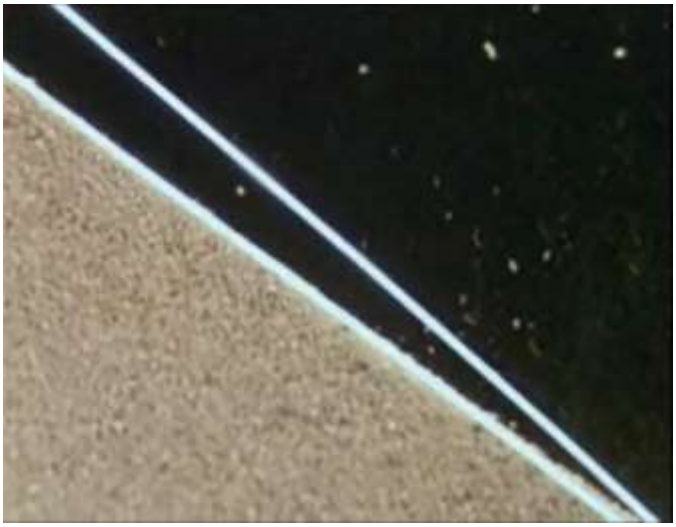


Comme toute matière granulaire, il est composé d'un ensemble de minuscules grains qui sont bien des solides, mais qui une fois regroupés dans un ensemble, possèdent certaines propriétés d'un liquide. Le sable n'a, par exemple pas de forme prédéfinie, comme c'est le cas des liquides. Si on le verse dans une bouteille, il en prendra la forme, comme le fait l'eau par exemple. Cependant, le sable n'a pas toutes les caractéristiques d'un liquide : quand on le verse sur une table, ou une autre surface plane, il forme une petite pyramide conique et ne s'étale pas comme le ferait de l'eau. Cette disposition naturelle en cône est due aux frottements entre les grains.

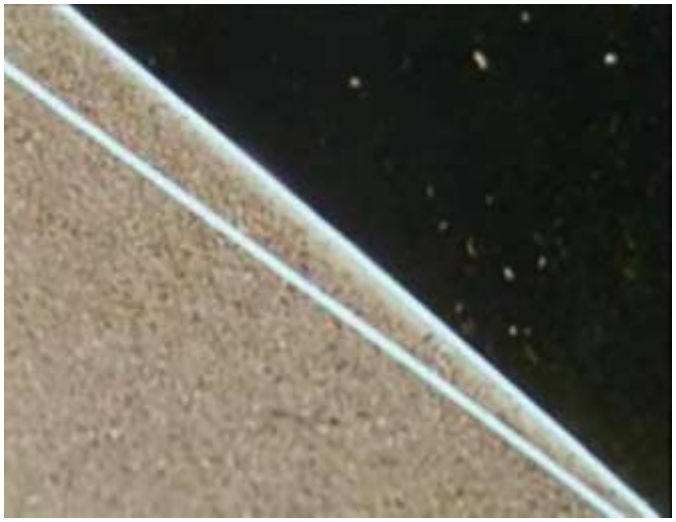
Le sable : solide ou liquide ?

2) Forme d'un tas (en 2D)

L'avalanche de sable est un phénomène naturel qui rythme la vie des dunes.
Les avalanches ont lieu lorsque l'angle de la dune atteint une certaine valeur. En effet, les dunes sont caractérisées par ce qu'on appelle des « angles limites ». L'angle formé par le sable varie entre deux angles : l'angle de repos et l'angle d'avalanche, séparés de quelques degrés.



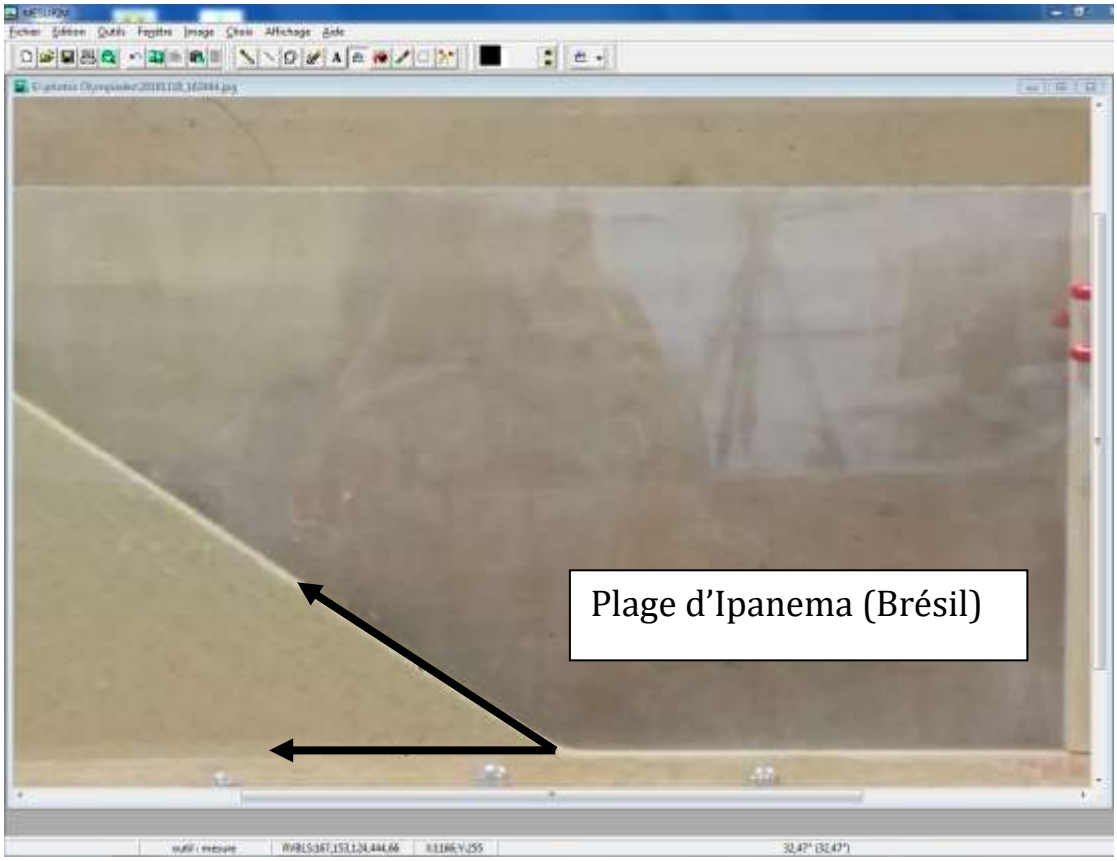
Angle de repos



Angle d'avalanche

Nous disposons au lycée de sables de diverses provenances. Pour chacun d'entre eux, nous avons mesuré l'angle de repos.

Pour cela, nous avons versé chaque sable entre deux parois de plexiglas (cellule de Hele-Shaw), pris une photographie et mesuré l'angle de repos avec le logiciel Mesurim .
Par exemple, pour le sable de la plage d'Ipanema (Brésil), on a obtenu un angle de 34 ± 2°



Mesure d'un angle de repos avec le logiciel Mesurim

<u>Tableau des mesures d'angles de repos de différents sables</u> :
(les mesures sont en degrés)

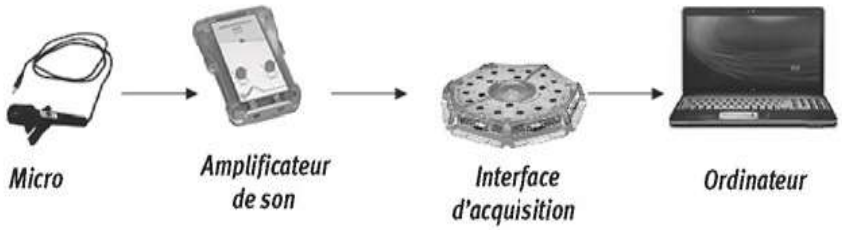
Sable	Ipanema	Hawaï	Caraïbes	Seychelles
Mesure 1	34,5	32,5	36,4	31,7
Mesure 2	32,5	34,3	36,8	32,1
Mesure 3	33,7	32,8	37,5	32,8
Mesure 4	35,5	33,5	37,8	31,6
Moyenne	34 ± 2	33 ± 2	37 ± 1	32 ± 1

III. Avalanche de sable

1) Montage expérimental

Le chant des dunes étant produit au cours d'une avalanche, il faut mettre le sable en mouvement.
Nous souhaitons alors réaliser une avalanche de sable au sein du lycée. Jérémie a fabriqué un support en bois de deux mètres de long que nous recouvrons de géotextile pour que le sable ne glisse pas sur la planche. Nous plaçons ce support selon un angle légèrement supérieur à l'angle d'avalanche précédemment déterminé (environ 35° pour le sable d'une plage d'Hawaï). Le sable est stocké tout en haut de la rampe et une planche l'empêche de tomber.
Une caméra filme l'expérience, et nous plaçons un micro au-dessus de la rampe pour enregistrer le chant que nous espérons ainsi créer.
Pour que l'avalanche commence, nous retirons la planche en haut de la rampe et le sable commence à descendre.

Jérémie en train de fabriquer la rampe



Mise en place du montage

Prêts pour l'avalanche !

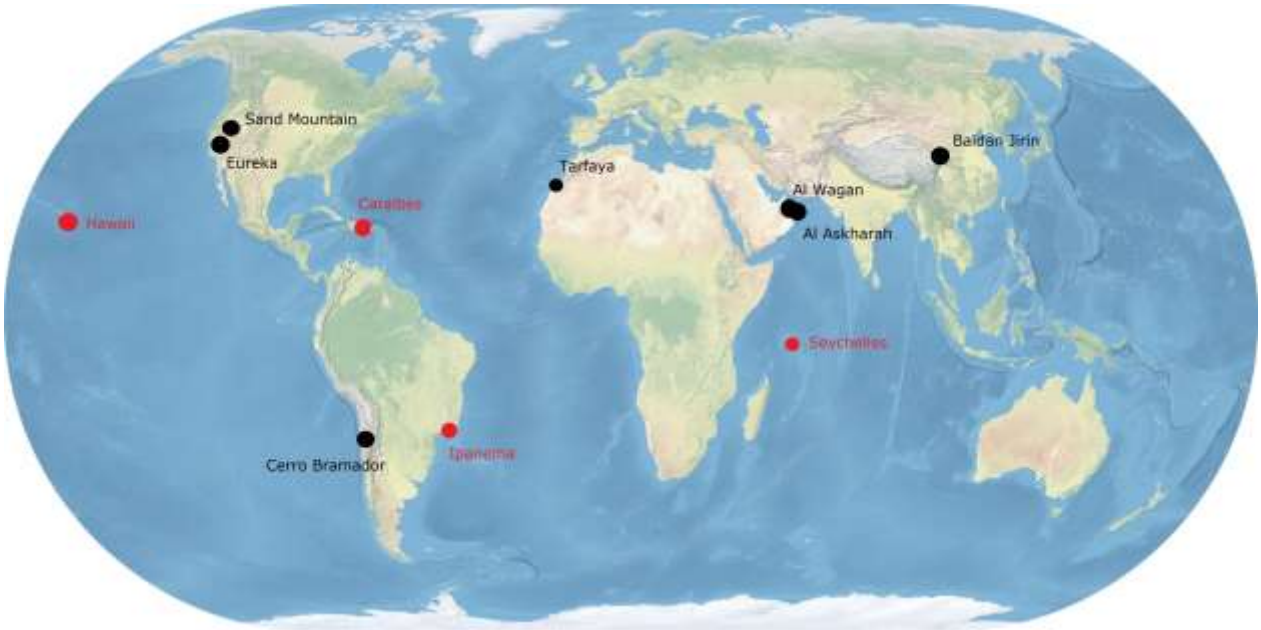
Malgré plusieurs tentatives, on constate que l'avalanche ne produit malheureusement aucun son particulier.
On a cherché quelles pourraient être les causes de cet échec.
Nous avons trouvé deux pistes : soit l'avalanche ne chante pas car il n'y a aucun vent, auquel cas c'est le vent qui produit un tel son en s'engouffrant entre les dunes ; soit parce que notre sable n'a pas les caractéristiques nécessaires pour émettre un son.

Au cours d'une émission de la série «On n'est pas que des cobayes», les scientifiques tentent de faire chanter une avalanche en laboratoire et y parviennent : le vent n'a donc aucun impact sur le chant du sable, d'autant plus que, dans le désert, lorsqu'il n'y a pas de vent, les dunes chantent quand même. Notre première hypothèse est donc fausse.

C'est donc peut-être du sable que vient notre problème. Après nous être longuement interrogés, nous ne trouvons pas pourquoi notre sable ne chante pas. Comment trouver une solution ?

2) Des aides précieuses : Simon Dagois-Bohy et des arénophiles !

Nous nous tournons alors vers Simon Dagois-Bohy, chercheur à l'université de Lyon 1, qui a écrit une thèse sur « Le chant des dunes » et qui en sait long sur ce sujet. Ce dernier accepte gentiment de nous aider à sortir de cette impasse. Dans un premier temps, il nous indique des zones dans le Monde où le sable a des propriétés chantantes : les sables dont nous disposons au lycée n'appartiennent pas à ces zones, excepté le sable de la Death Valley.



Localisations de quelques dunes chantantes dans le Monde

Il nous fournit également quelques enregistrements sonores de dunes chantantes, enregistrements qu'il avait effectués au cours de sa thèse. Malheureusement, il n'a pas d'échantillons des sables correspondants…

Il nous vient alors l'idée de demander de l'aide à des collectionneurs de sable passionnés, des arénophiles : certains possèdent plusieurs milliers d'échantillons du monde entier, tous classés de manière très précise.

Bibliothèque de sables du Monde

Sables classés et stockés dans des tubes fermés

Après plusieurs semaines de recherches sur internet, et d'échanges de mails, nous sommes parvenus à récupérer 5 échantillons de sables chantants.

Echantillons reçus par la Poste

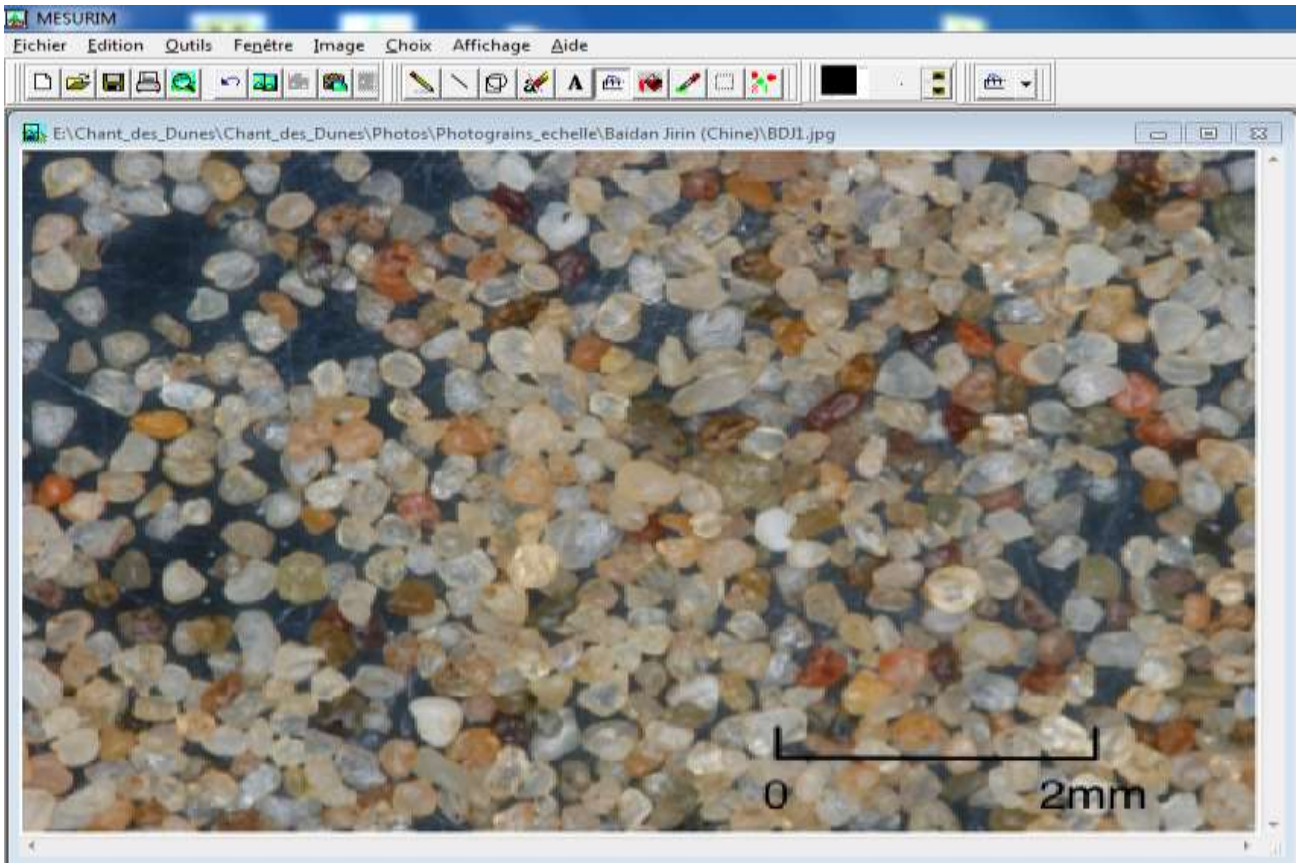
M. Dagois-Bohy nous conseille alors d'étudier la nature des grains constituant les sables dont nous disposons en les observant à la loupe binoculaire.

Après avoir adapté un appareil photo numérique sur l'un des oculaires de la loupe binoculaire, nous avons pris des photos des grains de sables qui proviennent des plages d'Ipanema (Brésil), de Punta Cana (Caraïbes), d'Hawaï, des Seychelles, ainsi que des dunes d'Al-Askharah et d'Al-Wagan (Oman), de Baidan Jirin (Chine), de Mar de Dunas (Chili), d'Eureka et de Sand Mountain (Californie) et d'Omega (Maroc).

Nous avons alors procédé à une étude statistique du diamètre des grains des différents échantillons.

3) Diamètre des grains : étude statistique

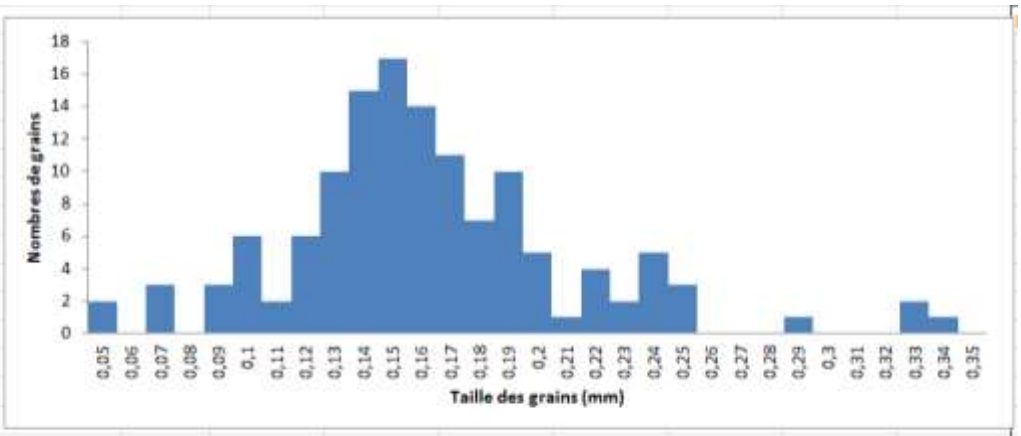
La photo ci-dessous montre comment nous avons procédé pour mesurer le diamètre des grains, de la dune de Baidan Jirin, par exemple.
Grâce au logiciel Mesurim, nous mesurons le diamètre moyen de 300 grains pour chaque sable.



Nous entrons ensuite ces mesures dans un tableau Excel. Pour chaque diamètre, nous indiquons le nombre de grains. Nous traçons alors l'histogramme des valeurs obtenues. Nous calculons enfin le diamètre moyen des grains de chaque dune.

Par exemple, avec le sable de la dune Omega (Maroc) :

Diamètre (mm)	Nombre	
0,05	2	0,1
0,06	0	0
0,07	3	0,21
0,08	0	0
0,09	3	0,27
0,1	6	0,6
0,11	2	0,22
0,12	6	0,72
0,13	10	1,3
0,14	15	2,1
0,15	17	2,55
0,16	14	2,24
0,17	11	1,87
0,18	7	1,26
0,19	10	1,9
0,2	5	1



Dune Omega (Maroc) : $d = 150 \pm 30\mu m$

Le tableau ci-dessous donne les différents diamètres moyens ainsi calculés.
Nous avons également calculé l'incertitude sur le diamètre : pour cela, nous avons calculé les écarts types de chaque série de mesures puis, à l'aide de la loi de Student, l'incertitude-type élargie à 95 %. Pour 300 mesures, on a pris un facteur d'élargissement k=1,98.
A partir de ces valeurs, nous avons alors déterminé l'incertitude relative pour avoir une indication de la dispersion de nos mesures.

Sable de désert	Baidan Jirin	Al-Wagan	Mar de Dunas	Omega, Maroc	Al-Askharah	Sand Mountain	Eureka
Diamètre moyen (µm)	250± 10	240± 50	150± 20	150± 30	130± 20	200± 30	200± 40
Incertitude relative	4 %	21 %	13 %	20 %	16 %	15 %	20 %

Sable de plage	Ipanema	Caraïbes	Hawaï	Seychelles
Diamètre moyen (µm)	580 ± 310	610 ± 150	160 ± 110	280± 190
Incertitude relative	53 %	25 %	69 %	68 %

Notons qu'il y a également une incertitude liée à la mesure des diamètres des grains sur Mesurim. En effet, les grains ne sont pas parfaitement ronds et donc il nous a fallu faire un choix pour mesurer les grains. Nous avons décidé de prendre un diamètre moyen pour chaque grain, c'est-à-dire le diamètre le plus représentatif de la dimension du grain. Nous avons fait le choix de négliger cette incertitude de mesures dans les précédents calculs.

On peut déjà remarquer une grande différence entre les deux tableaux : les sables de dunes (déserts) semblent avoir été tamisés, alors que les sables de plages sont très dispersés. De plus, en observant les grains, on remarque que les grains issus de plage ressemblent à des éclats de verre, ils sont très anguleux, contrairement aux grains chantants, plus polis.

Peut-on alors conclure que seul un sable bien calibré a des propriétés chantantes ?

IV. Du sable qui chante ?

1) Entretien avec S.Dagois-Bohy

C'est le moment de faire un premier bilan avec M. Dagois-Bohy.

Tous les sables ne chantent pas. C'est le premier constat qui s'impose à nous. On a donc la confirmation que seul un sable, ayant des caractéristiques précises, peut chanter.

Les sables de certaines plages chantent également…mais à des fréquences bien plus élevées.

Il nous fait également remarquer que les grains récupérés sur certaines dunes semblent recouverts d'un vernis : on peut s'en rendre compte à partir de l'observation d'irisations sur les grains éclairés en lumière blanche.
Il faut donc trouver un sable aux caractéristiques bien particulières.

Les grains chantants sont souvent opaques, et recouverts d'un vernis : ils ne sont plus transparents.

De plus, la régularité des grains ainsi que leur formes sont particulières : les grains ne sont pas brisés, ils sont tous relativement ronds.

Sable de la dune Al-Askharah

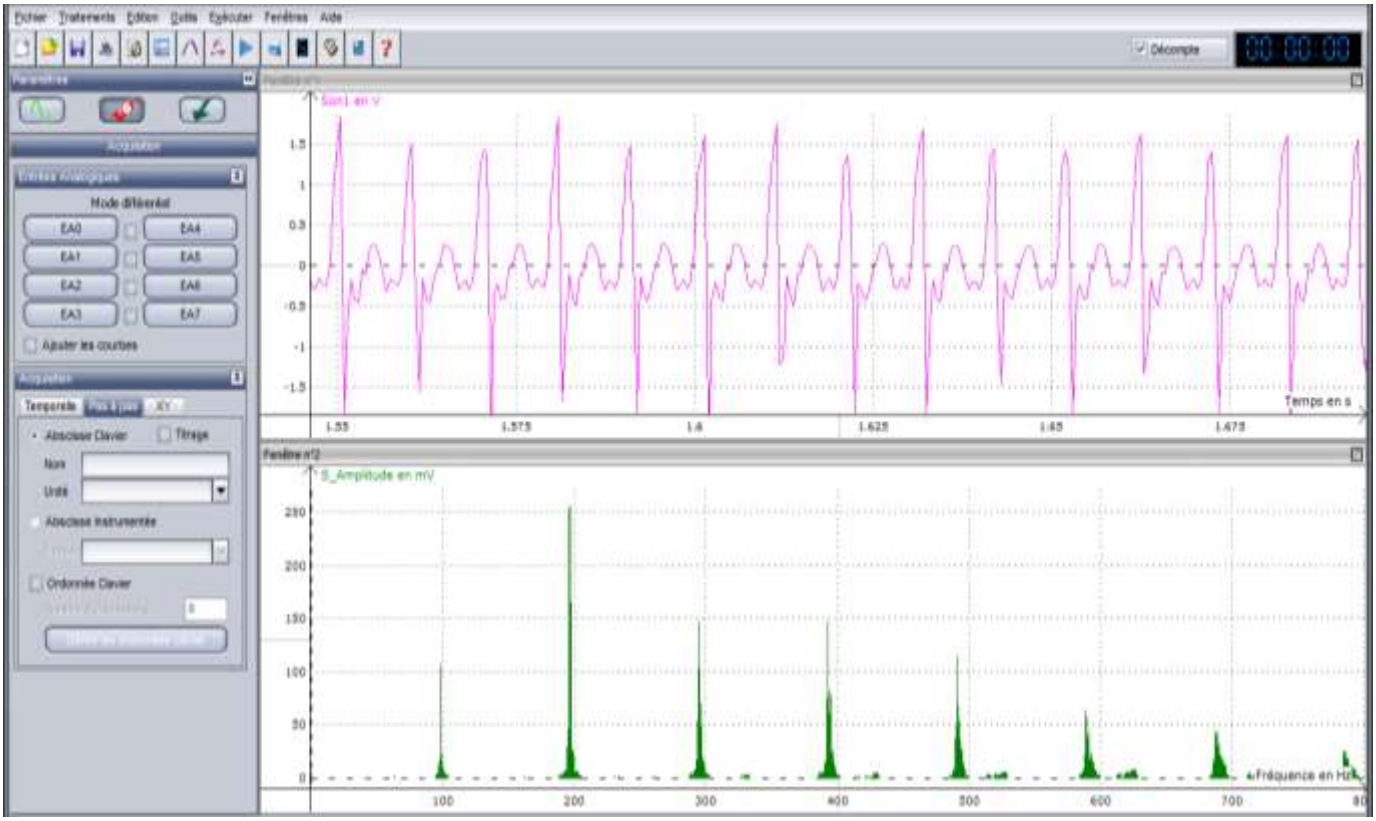
Certaines plages ont aussi un sable capable d'émettre un son, mais ce phénomène semble être différent de celui du sable chantant de désert. En France, une plage située dans les Landes est recensée. La particularité de cette plage est d'être composée de dunes qui séparent la plaine du littoral.

2) La dune, un instrument de musique ?

Dans ses écrits, Marco Polo comparait le son émis par une dune chantante à celui émis par un instrument de musique.
A quoi doit-on alors s'attendre sur les enregistrements ?
Analysons donc le son émis par un trombone.

Florian, élève de notre classe, jouant du trombone

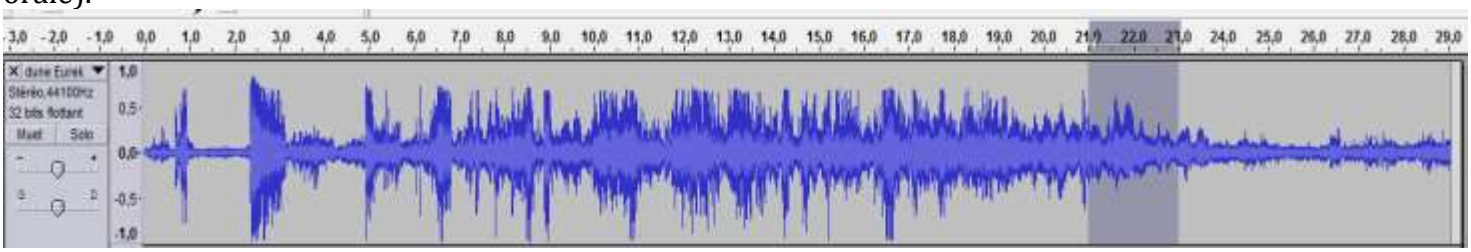
A l'aide du logiciel LatisPro, nous faisons une acquisition du son émis par le trombone : on obtient un signal périodique non sinusoïdal.
Puis nous effectuons une analyse de Fourier.



L'analyse spectrale nous montre que ce son est composé du fondamental (1er pic) et d'harmoniques dont les fréquences sont des multiples de celle du fondamental.
Ceci est caractéristique d'un son musical.

Qu'en est-il pour le son émis par une dune chantante ? Est-il bien analogue à celui d'un instrument de musique ?

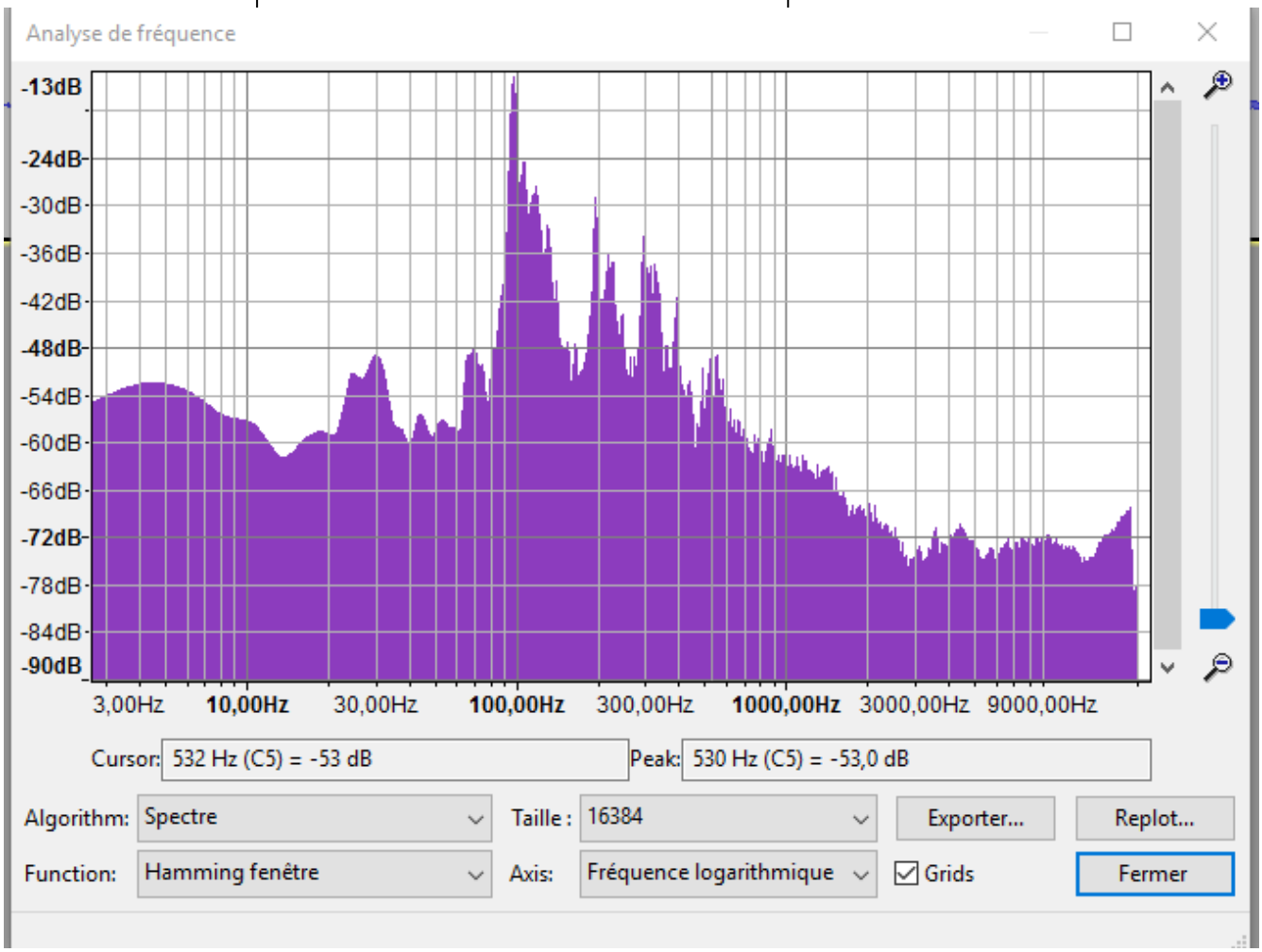
Avec le logiciel Audacity, nous avons commencé par analyser la bande son de la vidéo tournée sur la dune Eureka par les grands-parents de Valentine : elle était exploitable, malgré le bruit de fond, et les conditions « difficiles » d'enregistrement (nous montrerons les détails au cours de la présentation orale).



Bande son de la vidéo

Il suffit de sélectionner une partie de la bande son enregistrée, puis de faire l'analyse spectrale :

Fondamental de fréquence f1 = 88 Hz



On peut mesurer une fréquence fondamentale à 88 Hz (1er pic), et mettre en évidence les harmoniques de rang 2 et 3 (2ème et 3ème pics) : le son d'une dune chantante est bien analogue au son d'un instrument de musique.
De là à en conclure que le processus d'émission du son est similaire à celui d'un instrument de musique, il semble que ce ne soit pas le cas…mais c'est une autre histoire !

De la même manière, nous avons analysé les enregistrements fournis par M. Dagois-Bohy. Les enregistrements du chercheur sont de bien meilleure qualité que le précédent, ce qui nous a simplifié le travail.

Fréquence (Hz)	f1	f2	f3	f4	f5
Eureka	88	177	262		
Al Wagan	78	154	238	311	
Al Askharah	102	204	306	396	510
Mar de Dunas	97	197	290	387	483
Sand Mountain	84	169	252	339	
Baidan Jirin	80	162	243	323	

Résultats de l'analyse des bandes sons

3) Valentine part au Maroc

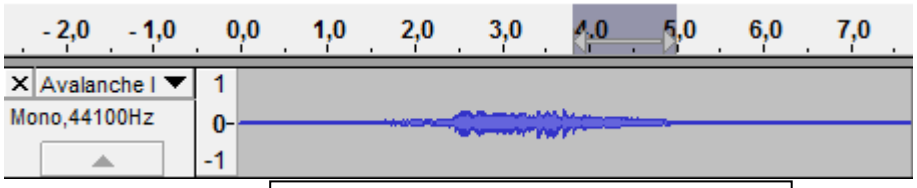
Pour faire chanter du sable dans notre laboratoire, il fallait donc trouver du sable…chantant !
Et nous avons eu une réelle opportunité d'aller en chercher : en effet, Valentine avait prévu, de longue date, d'aller à Agadir, au Maroc, pendant les vacances de la Toussaint, avec 13 membres de sa famille. Ses grands-parents étant du voyage, ils n'ont pas eu de peine à convaincre tout le groupe de faire quelques heures de route pour aller observer et écouter le chant de la dune barkhane Omega, située plus au sud, près de Tarfaya. Au retour de Valentine, nous avions enfin une quantité non négligeable de sable d'une dune chantante : 23 kg tout de même !

4) De retour au labo

En créant une avalanche dans notre laboratoire, avec le sable récupéré au Maroc, nous n'avons malheureusement pas entendu de grondement particulier, malgré plusieurs tentatives. Désespérés, nous nous sommes tournés vers notre parrain, S.Dagois-Bohy. Après lui avoir expliqué nos soucis, il nous a dit que le sable importé avait peut-être capté l'humidité de notre chère région. Il avait en effet été stocké dans une cabane de jardin (bravo Valentine !). Il nous a alors proposé de le sécher au four. Jérémie a proposé de s'en occuper. Pensait-il faire des sablés ?
Finalement, il a opté pour une autre solution : étaler le sable sur le carrelage du salon, chauffé par le plancher chauffant !
De retour au laboratoire après deux bonnes semaines de « séchage », l'expérience renouvelée nous a en effet permis d'entendre (et d'enregistrer) un vrombissement…mais plutôt bref…d'une durée de 2 à 3 secondes, et au début de la phase d'avalanche. Rien à voir avec les récits de nos grands voyageurs !

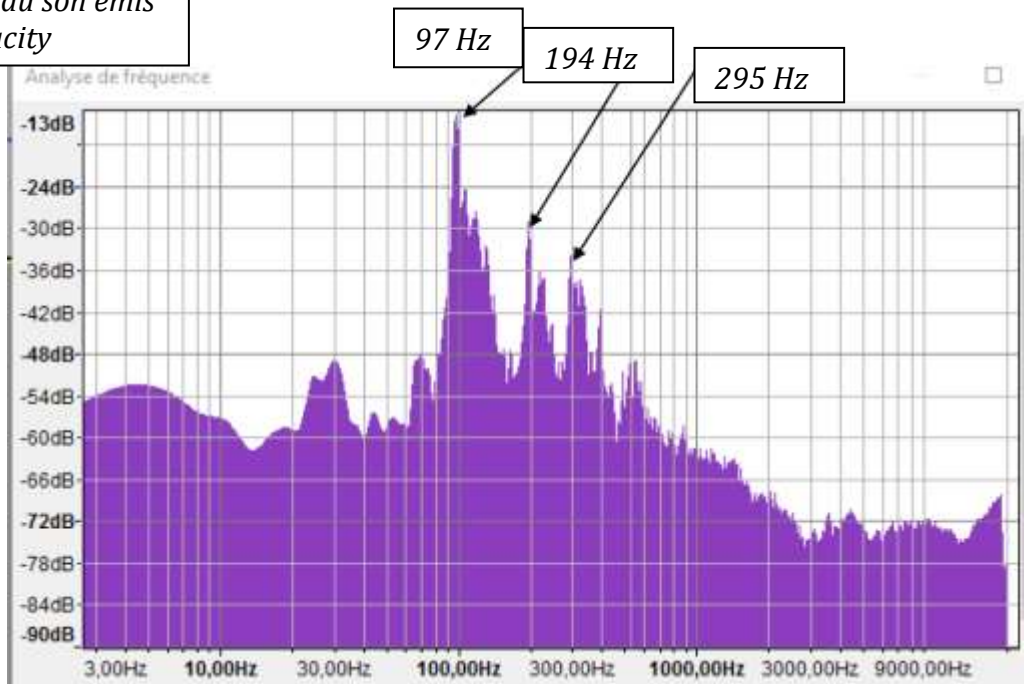
Du sable sèche sur le carrelage

Un peu déstabilisés, nous avons quand même tenté d'analyser le son émis lors du démarrage de l'avalanche. Et nous avons eu une très bonne surprise !



Enregistrement de 2,5s seulement

Analyse spectrale du son émis avec Audacity



Le pic le plus élevé (à gauche) est à 97 Hz ; d'autres autres pics suivent à 194 et 295 Hz.
On peut en déduire que le son émis est analogue à un son musical de fréquence 97 Hz (fondamental, ou 1er harmonique), et composé également des harmoniques de rang 2 (194 Hz) et 3 (295 Hz).

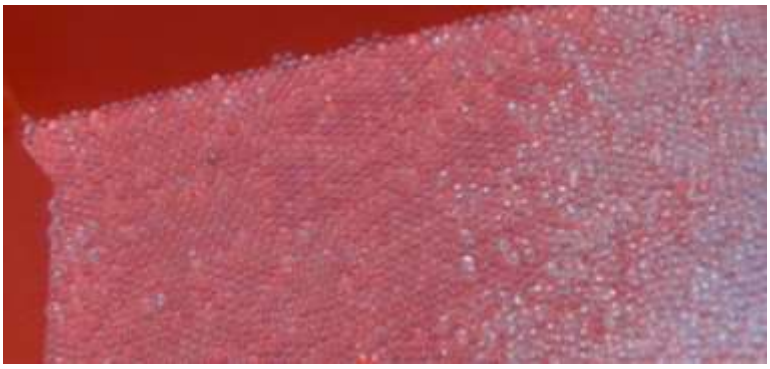
Nous souhaitions comparer cette fréquence à celle enregistrée sur le terrain. Malheureusement, pour enregistrer le grondement,Valentine a eu la bonne idée d'utiliser son téléphone portable…dont le microphone ne peut pas détecter des sons aussi graves…encore bravo Valentine !

Mais nous n'avons pas dit notre dernier mot !
En effet, Jérémie était très contrarié par la négligence de Valentine. Sans nous le dire, il avait alors envoyé des dizaines de mails à des personnes habitant Tarfaya ou Akhfennir, le village le plus proche de la dune : gérants d'hôtels, commerçants, instituteur, cuisinier, pharmacien, etc…parmi eux, Eric, gérant français d'un hôtel-restaurant à Akhfennir, a été sensibilisé par notre démarche, et a accepté de nous aider, malgré le manque de temps. Au moment où nous écrivons ces lignes, Eric doit être en train de recréer une avalanche sur la dune Omega, à 12 km de chez lui. Il nous a promis de nous tenir au courant dans les prochains jours.

Dans une dernière partie, nous avons alors tenté de trouver un modèle simple entre la fréquence f du son émis par les grains chantants et le diamètre d de ces grains.

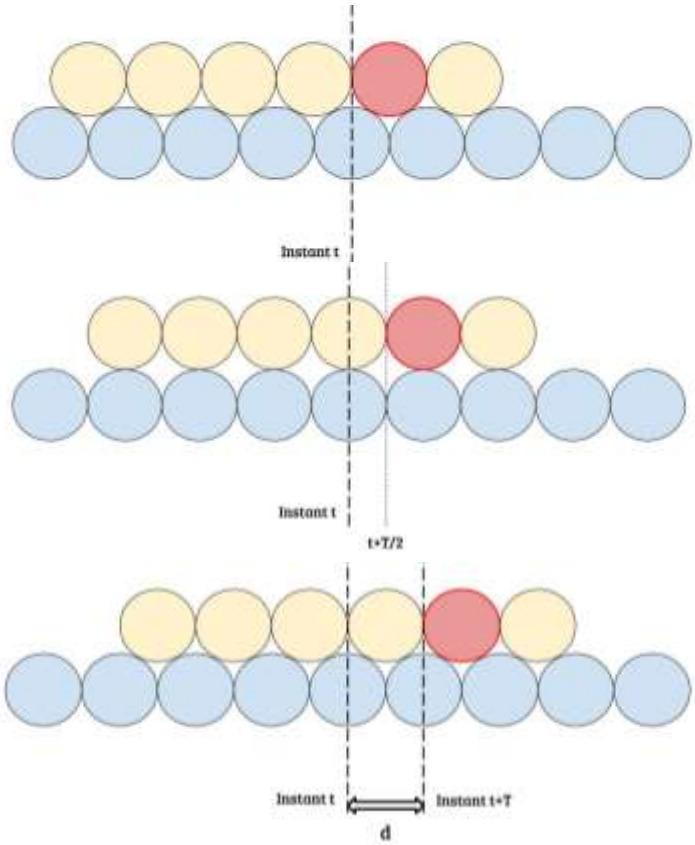
V. Essai de modélisation

1) Avec des billes en verre



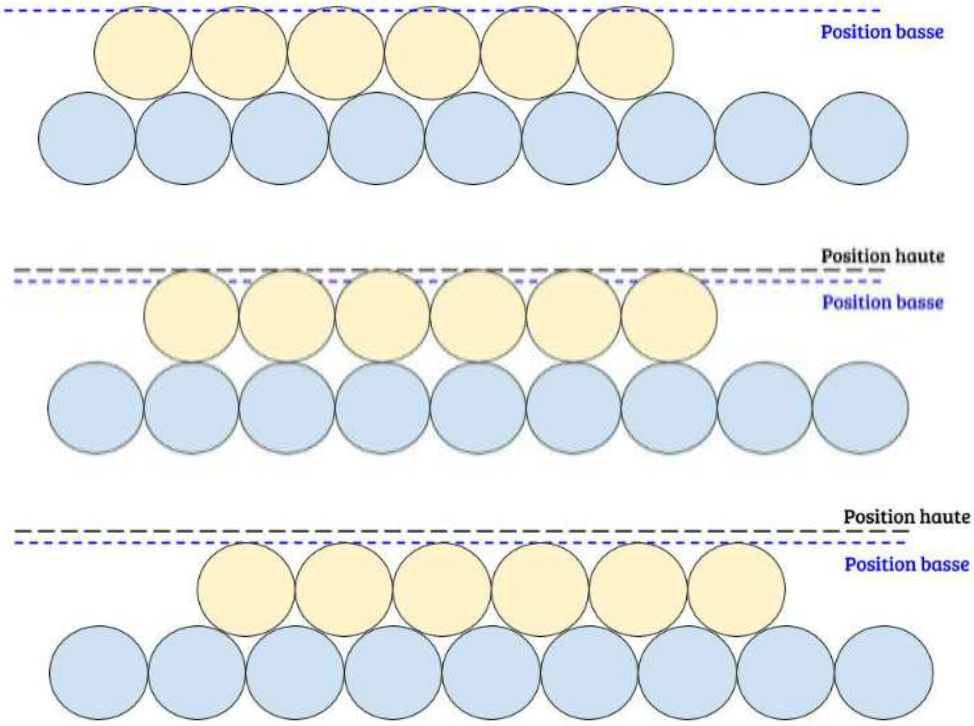
On suppose, pour simplifier l'étude, qu'un grain de sable est assimilable à une bille parfaitement sphérique et rigide.
On peut modéliser une avalanche avec des billes en verre de même diamètre, en se concentrant sur la chute d'une bille.

Pendant sa chute, pour passer d'un « creux » au suivant, la bille parcourt **une distance égale à son diamètre d.**



Il effectue le même mouvement jusqu'à arriver tout en bas de la couche. Il se retrouvera alors dans la couche inférieure, et d'autre grains dévaleront la pente par-dessus cette couche. Un tel écoulement des grains montre un décalage de la couche supérieure.

On peut voir que lors de l'écoulement des grains de sable, la surface de la dune se soulève puis revient dans sa position initiale et ce de façon répétée.

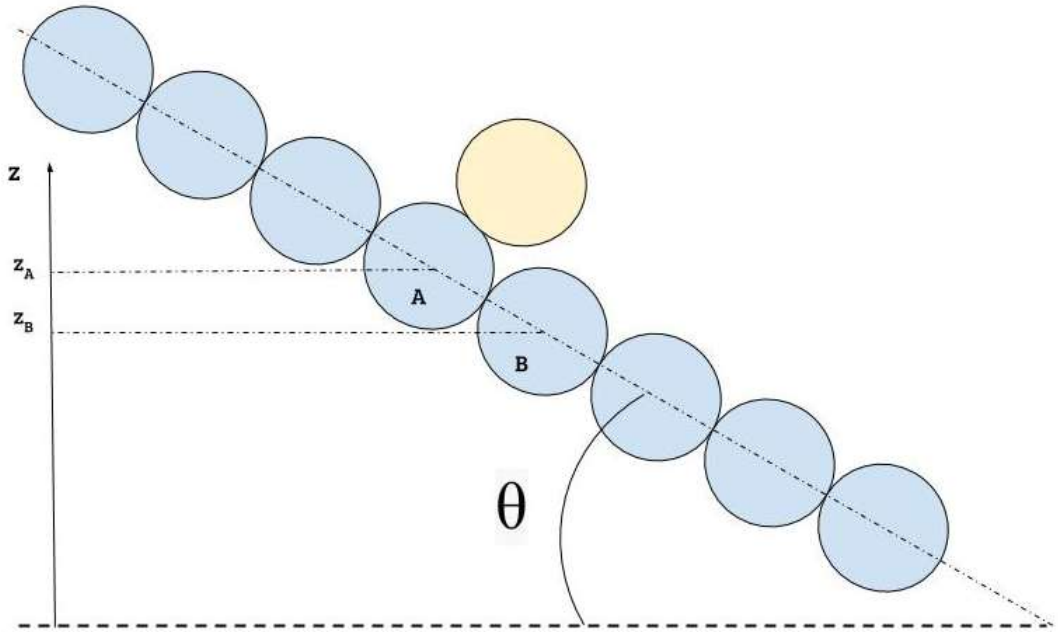


Ainsi, on peut imaginer que la surface du sable se soulève puis retombe de façon périodique et produit un son de fréquence *f*, telle la membrane d'un haut-parleur.

La distance d est parcourue à la vitesse v en une durée égale à la période T.

Ainsi $v = \frac{d}{T}$, soit $\frac{v}{d} = \frac{1}{T}$ or $f = \frac{1}{T}$ *donc* $f = \frac{v}{d}$

Pour la suite, nous supposerons que la bille roule (mais ne glisse pas) sur un plan de billes identiques, et que ce plan est incliné d'un angle θ avec l'horizontale.



Il y a 2 phénomènes en compétition :

-la gravité, qui accélère le disque
-les chocs inélastiques, qui le ralentissent

Sur une durée égale à une période T, on peut séparer le mouvement en deux phases :

1ère phase : entre 2 chocs consécutifs (chocs exclus) : on suppose que le système est conservatif, il y a donc conservation de l'énergie mécanique.

$\Delta E_m = \Delta E_c + \Delta E_{pp} = 0$ $\Delta E_c = -\Delta E_{pp} = -m.g.(z_B - z_A) = m.g.(z_A - z_B)$

$\Delta E_c = m.g.d.\sin\theta =$ Cte entre 2 chocs consécutifs ($\Delta E_c > 0$ donc la vitesse v augmente)

2ème phase : au cours du choc suivant, la bille freine, il y a dissipation d'énergie.

Au point B : $E_c(av) = \frac{1}{2}.m.v^2$ (juste avant le choc en B)

et $E_c(ap) = \varepsilon.E_c(av) = \varepsilon.\frac{1}{2}.m.v^2$ (juste après le choc en B , avec 0<ε<1)

Au cours du choc, l'énergie dissipée est : $\Delta E_c^{'} = E_c(av) - E_c(ap) = (1-\varepsilon).\frac{1}{2}.m.v^2$

Afin d'obtenir un son entretenu à la fréquence f fixée, on a supposé que la distance d entre deux chocs successifs était toujours parcouru pendant la même durée (la période T).
Autrement dit, l'énergie cinétique acquise entre deux chocs était compensée par l'énergie dissipée au cours du choc suivant :

$$\Delta E_c^{'} = \Delta E_c$$

$$\frac{1}{2}.m.v^2.(1-\varepsilon) = m.g.d.\sin\theta$$

$$v^2 = \frac{2.g.d.\sin\theta}{1-\varepsilon}$$

$$v = \sqrt{\frac{2.g.\sin\theta}{1-\varepsilon}}.\sqrt{d}$$

La vitesse v est donc proportionnelle à $\sqrt{d}$: $v = k.\sqrt{d}$

Rappelons la relation démontrée à la page précédente : $f = \frac{v}{d}$

Ainsi, on peut en déduire : $$f = \frac{k.\sqrt{d}}{d} = \frac{k}{\sqrt{d}}$$

BILAN : à partir de nos hypothèses, et d'après la démonstration ci-dessus, f serait proportionnelle à $\frac{1}{\sqrt{d}}$

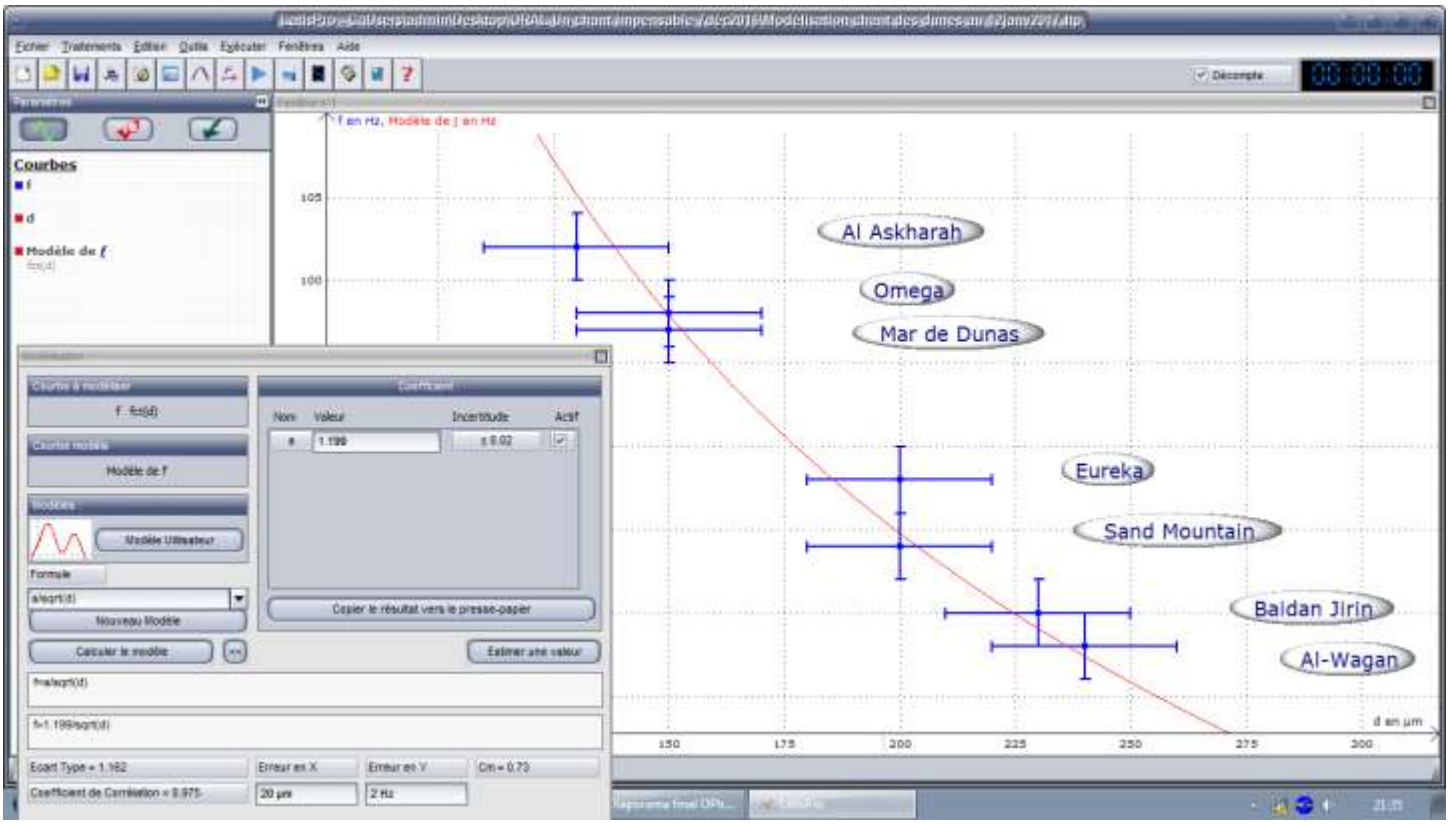
2) Confrontation de nos mesures au modèle théorique

Voici un tableau récapitulant les différentes valeurs de fréquences et de diamètres pour chaque sable :

lieu	Fréquence f (Hz)	Diamètre d (µm)
Eureka (USA)	88	200 ± 40
Al Ashkarah (Oman)	102	130 ± 20
Baidan Jirin (Chine)	80	230 ± 10
Al-Wagan (Oman)	78	240 ± 50
Mar de Dunas (Chili)	97	150 ± 20
Sand Mountain (USA)	84	200 ± 30
Omega (Maroc)	97	150 ± 30

Avec le logiciel Latis Pro, on a alors confronté nos mesures au modèle théorique précédent.
Dans le tableur, on a rentré les valeurs de fréquence et de diamètre moyen des grains.
Puis, on a placé f sur l'axe des ordonnées, et d sur l'axe des abscisses.

Afin de vérifier la proportionnalité de f et $\frac{1}{\sqrt{d}}$, nous avons utilisé la courbe modèle : $f = a \times \frac{1}{\sqrt{d}}$



Modélisation avec le logiciel Latis Pro

Concernant les barres d'incertitudes, nous n'avons pas trouvé le moyen de les modifier pour chaque point. Nous avons donc décidé de choisir les incertitudes moyennes de 20µm pour le diamètre d, et 2 Hz pour la fréquence f.

Le résultat de la modélisation nous donne la formule suivante : $f = 1{,}2 \times \frac{1}{\sqrt{d}}$

On constate que, dans l'ensemble, la courbe modèle passe par la plupart des barres d'incertitudes : on peut donc considérer que ce modèle est tout à fait acceptable.

3) Pour aller plus loin

Bouillie de micro-billes

Dans une entreprise de peinture, nous avons trouvé des micro-billes de verre d'environ 100 µm de diamètre. Nous avons pris deux sacs de 25 kg.
Nous sommes en train d'enrober ces micro-billes de verre avec un mélange de chlorure de sodium et de carbonate de magnésium, suivant une recette que les parents de Jérémie apprécient beaucoup : il s'agit de préparer, dans une marmite, une solution d'eau très salée, avec un peu de carbonate de magnésium, d'ajouter 2-3 kg de micro-billes, de faire bouillir, puis de laisser sécher les micro-billes pendant 10 jours au sol (de préférence sur le plancher chauffant du salon !). Il faut répéter cela plusieurs fois.

Nous avons actuellement déjà préparé 12 kg de micro-billes : et celles-ci émettent déjà un son étonnant lorsqu'on les manipule ! L'objectif est d'obtenir environ 40 kg de micro-billes chantantes, de créer une avalanche dans notre laboratoire, et de vérifier si la fréquence du son émis et le diamètre moyen des micro-billes enrobées sont en accord avec notre modèle théorique. C'est une course contre la montre !

Séchage dans le salon

VI. Conclusion

Lors de nos recherches, nous avons tenté de comprendre le mécanisme permettant au sable de chanter.
Cette capacité est due à de nombreuses caractéristiques du sable qui compose la dune : tout d'abord, les grains des dunes chantantes sont recouverts d'une sorte de vernis, et ont une forme plus ou moins ronde. Le sable qui chante a beaucoup voyagé et, grâce au phénomène d'érosion, il est beaucoup plus lisse qu'un sable de plage, qui demeure assez anguleux. C'est en particulier cette forme ronde qui permet aux grains de rouler les uns sur les autres lors des avalanches de sable. L'écoulement se déroule de façon périodique, ce qui crée un espace entre les grains qui se dilate et se compresse comme la membrane d'un microphone : ceci est à l'origine de l'émission de ce grondement particulier appelé « chant des dunes ».

Bien évidemment, certaines de nos expériences ne se sont pas déroulées comme nous l'avions prévu, mais loin de nous décourager, cela nous a permis de nous remettre en cause et de nous questionner quant à notre manière de fonctionner. Grâce à ces échecs, nous avons tous progressé.

Nous tenons aussi à insister sur le fait que cette expérience a été très enrichissante pour chacun de nous. Nous nous sommes toujours soutenus mutuellement, et des liens se sont créés. C'est dans un esprit d'entraide et de soutien que s'est déroulé ce projet. Nous avons appris beaucoup de choses, notamment l'autonomie et la prise d'initiatives. Et surtout, grâce aux différents contacts que nous avons eus, on a eu l'impression de voyager dans le Monde entier.

Remerciements :

Ce projet n'aurait pas été réalisable sans l'aide et le soutien de certaines personnes :

-Simon Dagois-Bohy, chercheur qui, tout au long de notre projet, nous a soutenus et orientés lorsque nous empruntions la mauvaise direction. Nous le remercions pour son aide précieuse,
-les grands-parents de Valentine, qui ont initié l'étincelle dans nos yeux,
-les parents de Jérémie, qui ont eu beaucoup de patience pendant les vacances de Noêl…même si, finalement, Jérémie a été prié de continuer ses expériences à la cave !
-Eric Rogal, restaurateur à Akhfenir au Maroc, et notre contact sur place,
-Jocelyne, chef d'entreprise, qui nous a trouvé les sacs de micro-billes,
-Florence (http://www.passion-sables.com) et Christiane (http://sablesdemyrtille.e-monsite.com), arénophiles passionnées, qui nous ont envoyés des échantillons de sable, juste par amitié !
-tous les préparateurs de physique-chimie et de SVT pour leur disponibilité et leur patience, qui nous ont permis de réaliser toutes nos expériences.
-le personnel d'entretien du lycée qui doit nous maudire…
-M. Vidal et Hildenbrand, professeurs de physique-chimie et de SVT, qui avaient toujours du temps pour répondre à nos questions.
-Enfin, nous remercions notre professeur de physique-chimie, Monsieur Martin, qui a fait preuve d'une patience admirable tout au long de ce projet, et qui a su nous guider très justement jusqu'à ce que nous ayons atteint notre but. Nous lui sommes reconnaissants d'avoir toujours cru en nous, même lors de nos échecs.

SOURCES

1) Images

Photo de couverture :
http://images.google.fr/imgres?imgurl=http%3A%2F%2Fi-cms.linternaute.com%2Fimage_cms%2Foriginal%2F807094-concert-de-dunes-au-sahara.jpg&imgrefurl=http%3A%2F%2Fwww.linternaute.com%2Fscience%2Fenvironnement%2Fconstructions-geologiques%2Fdunes-de-sable.shtml&h=360&w=540&tbnid=97EFoqSff-goZM%3A&vet=1&docid=1EgaNXTjIVCazM&ei=4EQ1WN6NEoatUcCEp-gF&tbm=isch&iact=rc&uact=3&dur=309&page=0&start=0&ndsp=39&ved=0ahUKEwje_d2Rrb7QAhWGVhQKHUDCCV0QMwg-KB4wHg&safe=strict&bih=974&biw=1920

2) Bibliographie

Thèse de Simon Dagois-Bohy : Le Chant des Dunes, Mouvements Collectifs dans un écoulement granulaire
https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00770253/

3) Logiciels

Pour les mesures des diamètres des grains et des angles limites : Mesurim
Pour les analyses des enregistrements sonores : Audacity
Pour l'analyse du son du trombone : Latis Pro

4) Webographie

« On n'est pas que des cobayes » - Peut-on faire chanter les dunes ?
https://www.youtube.com/watch?v=-TL7HQo7JNE

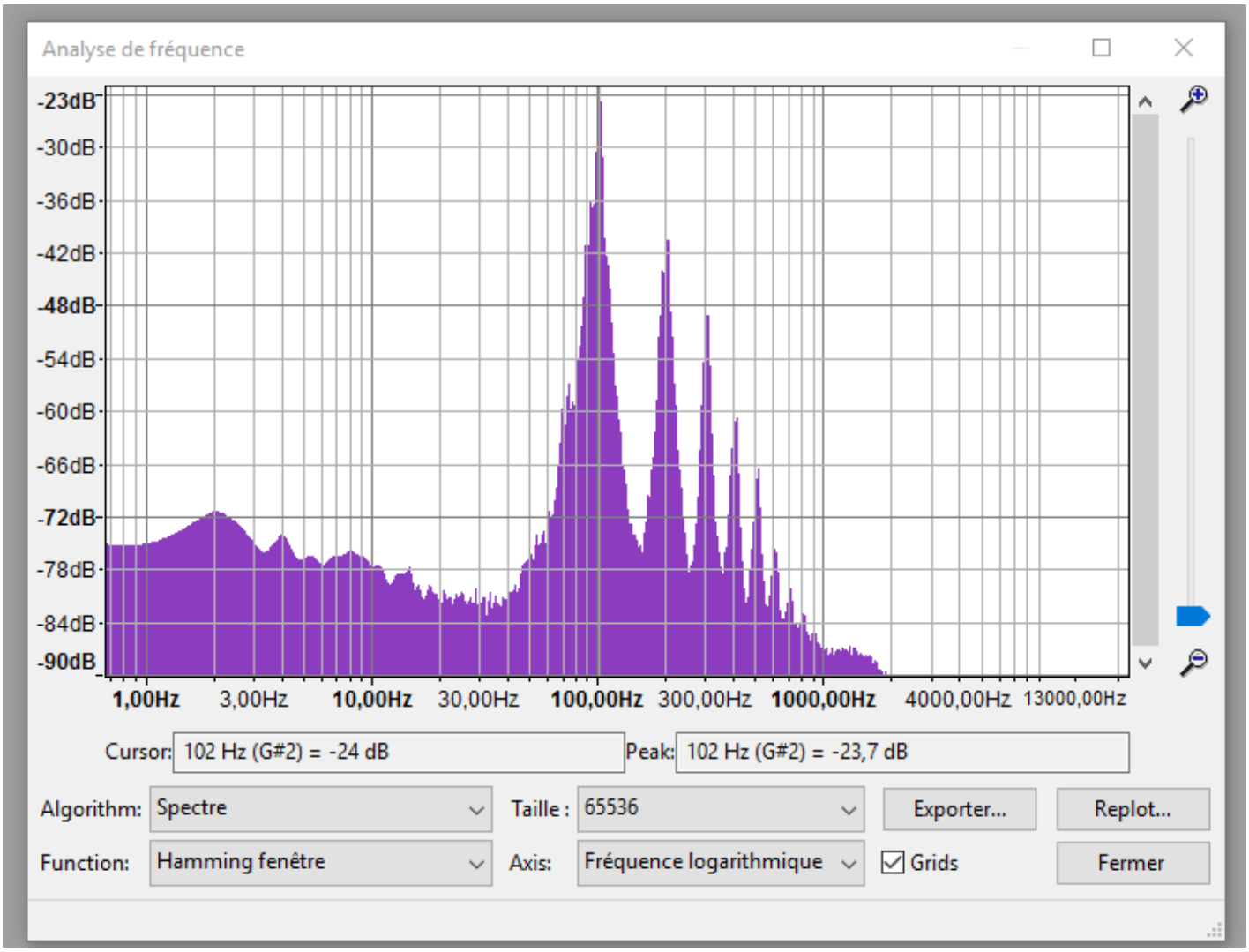
ANNEXES

IV. Du sable qui chante ?

2) La dune, un instrument de musique ?

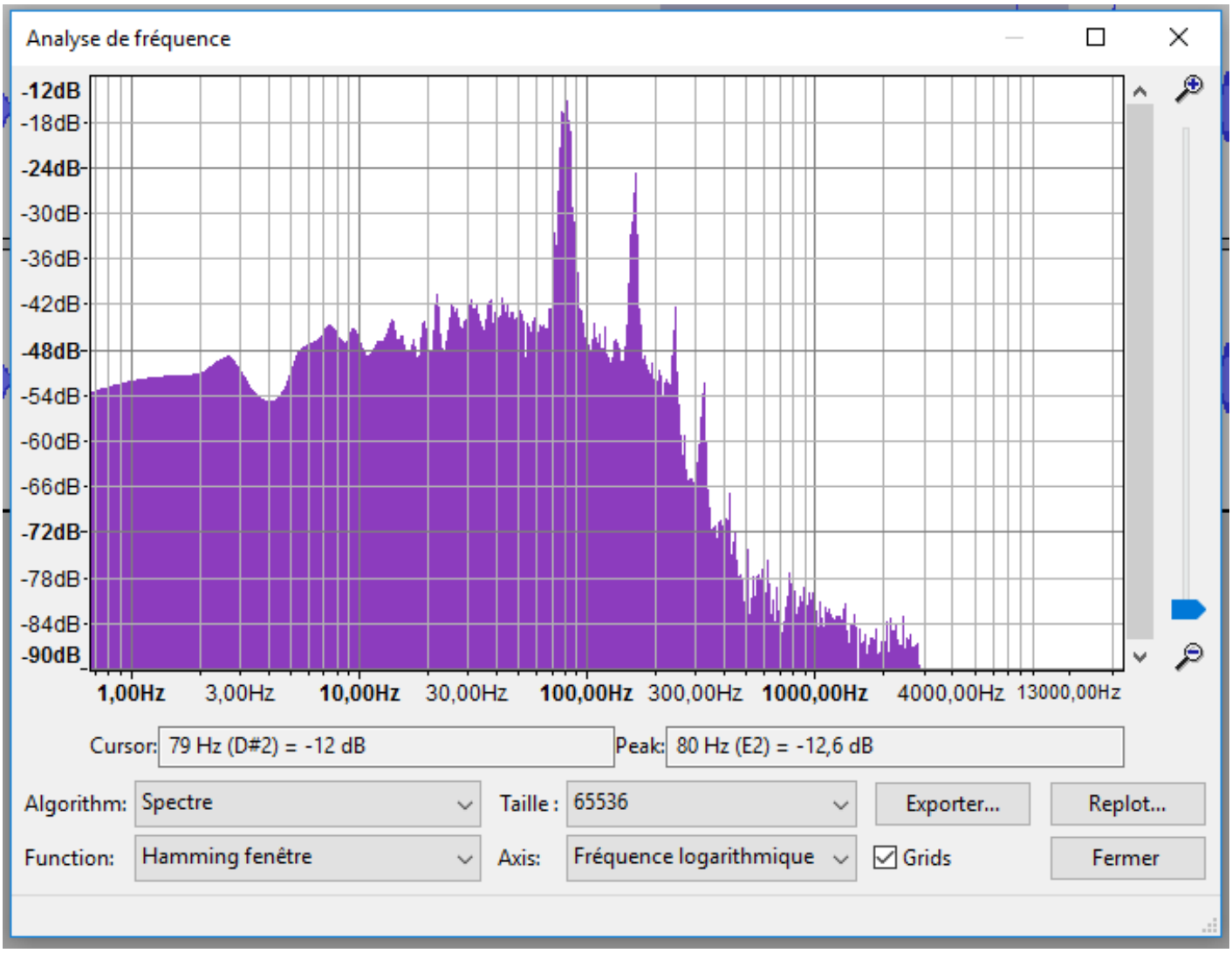
Exemples de fichiers sons analysés avec le logiciel Audacity. Un réticule est disponible pour mesurer la fréquence des harmoniques. L'échelle des fréquences est à décades.

a) Al Askharah (Oman)



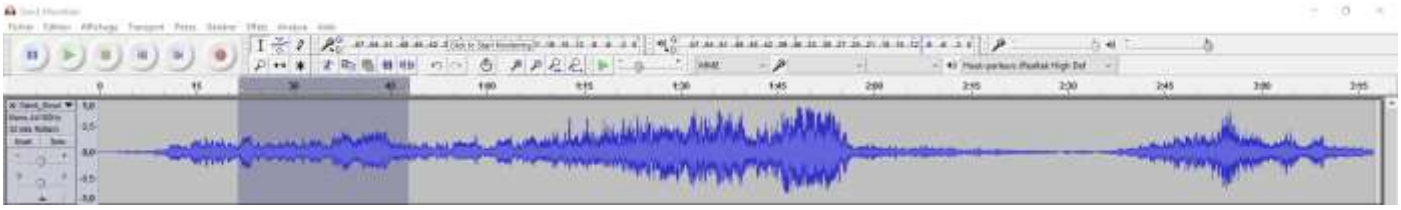
Fréquence (Hz)	f1	f2	f3	f4	f5
Al Askharah	102	204	306	396	510

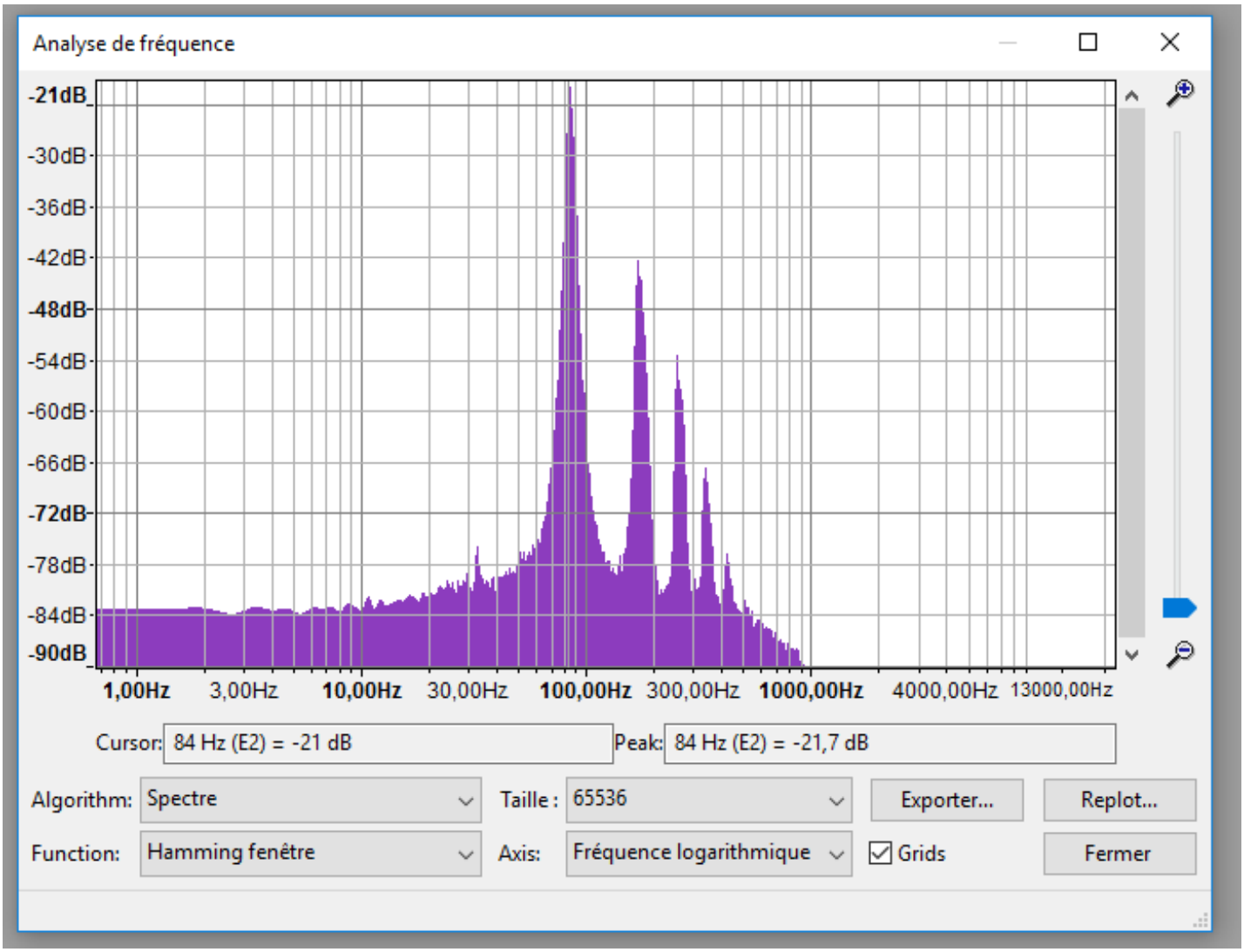
b) Baidan Jirin (Chine)



Fréquence (Hz)	f1	f2	f3	f4	f5
Baidan Jirin	80	162	243	323	

c) Sand Mountain (USA) :





Fréquence (Hz)	f1	f2	f3	f4	f5
Sand Mountain	84	169	252	339	